

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ САМОТОРМОЗЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВСТАВКОЙ

Л. К. БУРУЛЬКО, Э. М. ГУСЕЛЬНИКОВ, Е. В. КОНОНЕНКО, Т. В. ЧЕШЕВА

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Повышение производительности труда в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и в других отраслях народного хозяйства ставит перед электромашиностроением задачи по созданию совершенных конструкций электрических двигателей, которые за счет увеличения скорости и уменьшения непроизводительности времени, затрачиваемого на их остановку, должны повысить производительность исполнительных механизмов.

Одним из решений этой задачи является создание электродвигателей со встроенными и пристроенными тормозными устройствами, обеспечивающими в нужный момент остановку машины.

В настоящее время как за рубежом, так и в отечественной промышленности выпускаются в основном электродвигатели со встроенными электромагнитными тормозами постоянного и переменного тока. Однако эти электродвигатели не удовлетворяют всем требованиям, которые предъявляются к идеальным электродвигателям с тормозными устройствами. Поэтому считают [2], что наиболее полно такие требования могут быть удовлетворены с помощью так называемых самотормозящихся электродвигателей СЭД.

В отличие от электродвигателей со встроенными и пристроенными электромагнитными тормозами, у которых для управления тормозным устройством выполняется специальная обмотка, в самотормозящихся электродвигателях управление тормозом осуществляется с помощью магнитного потока самого электродвигателя.

В работе рассматривается и исследуется одна из конструкций самотормозящегося электродвигателя, разработанная в СКБ электромашиностроения (г. Томск) [2].

Конструктивная форма исполнения такого двигателя представлена на рис. 1. Статор 1 самотормозящегося электродвигателя выполнен как в обычной машине. Сердечник ротора имеет две части: тормозную 4 и основную 2, разделенные немагнитной прокладкой 3. Электромагнитная вставка (якорь) 5 соединена с вентилятором, который служит одновременно тормозным диском и может перемещаться в аксиальном направлении по шлицам на валу. Основная часть пакета ротора набирается из обычных листов, а листы тормозной части штампуются из стали толщиной 2—3 мм и имеют конфигурацию паза, показанную на рис. 2. После спрессовки и заливки ротора алюминием тормозная часть ротора протачивается таким образом, чтобы зубцы оказались разделенными друг от друга (рис. 2).

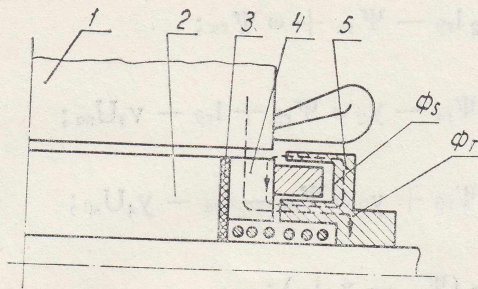


Рис. 1. Конструкция самотормозящегося электродвигателя с электромагнитной вставкой

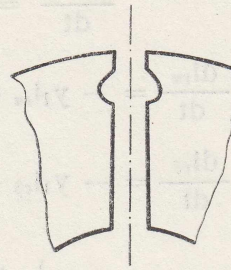


Рис. 2. Конфигурация паза тормозной части

При подаче напряжения на обмотку статора часть основного потока Φ_T проходит через специальную часть ротора, воздушный зазор между электромагнитной вставкой и торцом специальной части и замыкается по электромагнитной вставке, как по ярму. Поток рассеяния Φ_S короткозамкнутого кольца специальной части ротора также проходит в электромагнитную вставку через воздушный зазор. Под действием возникающих при этом электромагнитных сил вставка, преодолевая усилие пружины, притягивается к торцу специальной части ротора и тянет за собой вентилятор. Вентилятор отходит от тормозных накладок и двигатель растормаживается.

Для исследования электромеханических переходных процессов таких двигателей необходимо составить уравнения, описывающие работу двигателя при пуске и торможении. Эти уравнения должны описывать как процесс включения двигателя в сеть, так и процесс отключения от сети. Кроме этого, они должны учитывать, что во время переходных процессов сила притяжения, создаваемая специальной (тормозной) частью ротора, меняется по величине.

При составлении уравнений равновесия напряжений предполагаем, что параметры обмотки статора r_1 , x_1 и активное сопротивление ротора r_2' не зависят от величины воздушного зазора δ между специальной частью ротора и электромагнитной вставкой, воздушный же зазор влияет только на индуктивные сопротивления взаимоиндукции x_m и рассеяния роторной обмотки x_2' . Для этого, чтобы найти величину силы притяжения $F_{пр}$, индуктивные сопротивления x_m и x_2' разбиваем на составляющие: x_{m0} и x_{20}' — индуктивные сопротивления взаимоиндукции и рассеяния основной части ротора, x_{mg} и x_{2g}' — индуктивные сопротивления взаимоиндукции и рассеяния специальной части ротора.

Учитывая изложенное, можно параметры самотормозящегося электродвигателя записать в относительных единицах в следующем виде:

$$x_s = x_1 + x_{m0} + x_{mg} \text{ — полное индуктивное сопротивление обмотки статора;}$$

$$x_2 = x_{20}' + x_{2g}' + x_{m0} + x_{mg} \text{ — полное индуктивное сопротивление обмотки ротора;}$$

$$x_m = x_{m0} + x_{mg} \text{ — индуктивное сопротивление взаимоиндукции;}$$

$$r_1 \text{ и } r_2' \text{ — активные сопротивления обмоток статора и ротора.}$$

Уравнения равновесия напряжений обмотки ротора, записанные в синхронно вращающейся системе координат, имеют вид [1, 3]:

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = -r_2 i_{r\alpha} + \Psi_{r\beta} - \omega \Psi_{r\beta};$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= -r_2 i_{r\beta} - \Psi_{r\alpha} + \omega \Psi_{r\alpha}; \\
\frac{di_{r\alpha}}{dt} &= -y_1 i_{r\alpha} + y_3 \Psi_{r\alpha} - y_2 \omega \Psi_{r\beta} + i_{r\beta} - y_4 U_{s\alpha}; \\
\frac{di_{r\beta}}{dt} &= -y_1 i_{r\beta} + y_3 \Psi_{r\beta} + y_2 \omega \Psi_{r\alpha} - i_{r\alpha} - y_4 U_{s\beta}; \\
i_{s\alpha} &= \frac{1}{x_m} (\Psi_{r\alpha} - x_2 i_{r\alpha}); \\
i_{s\beta} &= \frac{1}{x_m} (\Psi_{r\beta} - x_2 i_{r\beta}),
\end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}
y_1 &= \frac{r_1 x_r + x_s r_2}{x_s x_r - x_m^2}; \\
y_2 &= \frac{x_s}{x_s x_r - x_m^2}; \\
y_3 &= \frac{r_1}{x_s x_r - x_m^2}; \\
y_4 &= \frac{x_m}{x_s x_r - x_m^2};
\end{aligned}$$

Электромагнитный момент вращения определяется равенством

$$M = \Psi_{r\beta} i_{r\alpha} - \Psi_{r\alpha} i_{r\beta}. \tag{2}$$

При работе электродвигателя от сети с постоянным напряжением и частотой составляющие вектора напряжений в рассматриваемой системе координат являются постоянными величинами и равны

$$\begin{aligned}
U_{s\alpha} &= U_m \cos \alpha_0, \\
U_{s\beta} &= U_m \sin \alpha_0,
\end{aligned} \tag{3}$$

где α_0 — начальная фаза.

При отключении двигателя от сети и торможении уравнения равновесия напряжений примут вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= -r_2 i_{r\alpha} + \Psi_{r\beta} - \omega \Psi_{r\beta}; \\
\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= -r_2 i_{r\beta} - \Psi_{r\alpha} + \omega \Psi_{r\alpha}; \\
\frac{di_{r\alpha}}{dt} &= -y_1' i_{r\alpha} - y_2' \omega \Psi_{r\beta} + i_{r\beta}; \\
\frac{di_{r\beta}}{dt} &= -y_1' i_{r\beta} + y_2' \omega \Psi_{r\alpha} - i_{r\alpha}; \\
i_{r\alpha} &= \frac{\Psi_{r\alpha}}{x_r}; \\
i_{r\beta} &= \frac{\Psi_{r\beta}}{x_r},
\end{aligned} \tag{4}$$

где

$$y_1' = \frac{r_r}{x_r},$$

$$y_2' = \frac{1}{x_r}.$$

Электромагнитный момент при отключении двигателя от сети равен нулю

$$M = 0. \quad (5)$$

Величина силы притяжения, создаваемая тормозной частью ротора, может быть определена из следующего уравнения:

$$F_{пр} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \quad (6)$$

где

Φ — магнитный поток в воздушном зазоре между специальной частью ротора и электромагнитной вставкой;

S — площадь сечения торца магнитопровода специальной части ротора, к которой притягивается электромагнитная вставка.

Из принципа работы тормозного устройства видно, что в создании силы притяжения участвуют два потока: Φ_s — поток рассеяния короткозамкнутого кольца специальной части ротора и Φ_T — часть основного потока, замыкающегося через специальную часть ротора и электромагнитную вставку. Поэтому магнитный поток можно представить в следующем виде:

$$\Phi = \Phi_s + \Phi_T. \quad (7)$$

Для того, чтобы учесть влияние величины силы притяжения на электромеханические переходные процессы СЭД и установить характер изменения этой силы во время переходных процессов, уравнение (7) запишем через составляющие по двум осям α и β . Так как в относительных единицах поток равен потокоцеплению, то уравнение (7) в осях α и β будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Psi_{r\alpha g} &= \left(x_{rg} + x_{mg} - \frac{x_{mg} x_r}{x_m} \right) i_{r\alpha} + \frac{x_{mg}}{x_m} \Psi_{r\alpha}; \\ \Psi_{r\beta g} &= \left(x_{rg} + x_{mg} - \frac{x_{mg} x_r}{x_m} \right) i_{r\beta} + \frac{x_{mg}}{x_m} \Psi_{r\beta}, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\left(x_{rg} + x_{mg} - \frac{x_{mg} x_r}{x_m} \right) i_{r\alpha} \text{ и } \left(x_{rg} + x_{mg} - \frac{x_{mg} x_r}{x_m} \right) i_{r\beta} -$$

составляющие потокоцепления по осям α и β , соответствующие потоку рассеяния короткозамкнутого кольца специальной части ротора Φ_s ;

$$\frac{x_{mg}}{x_m} \Psi_{r\alpha} \text{ и } \frac{x_{mg}}{x_m} \Psi_{r\beta} - \text{составляющие потокоцепления по}$$

осям α и β , соответствующие части основного потока Φ_T .

Зная потокоцепления специальной части ротора, запишем уравнение (6) в следующем виде:

$$F_{пр\alpha} = \frac{\Psi_{r\alpha g}^2}{2\mu_0 S},$$

$$F_{пр\beta} = \frac{\Psi^2_{r\beta} g}{2\mu_0 S} \quad (9)$$

При исследовании электромеханических переходных процессов наряду с уравнениями равновесия напряжения электрических контуров необходимо иметь уравнение движения ротора. Рассмотрим процесс пуска и торможения СЭД, когда электромагнитная вставка находится в двух крайних положениях, в зависимости от которых уравнения движения ротора имеют тот или иной вид.

Пуск самотормозящегося двигателя. Пуск СЭД можно разделить на следующие два этапа: момент трогания и момент разгона двигателя.

В момент трогания двигателя с места величина силы притяжения $F_{пр}$ меньше силы начального сжатия N_0 , поэтому тормозной момент, создаваемый пружиной, не равен нулю

$$M_T = N_\mu R, \quad (10)$$

$$N = N_0 - F_{пр},$$

где μ — коэффициент трения.

Уравнение движения в этом случае имеет вид

$$M = M_T + M_c + I \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

Здесь M_c — момент сопротивления нагрузки.

В момент разгона двигателя силы притяжения $F_{пр} > N_0 + C\delta_x$ и электромагнитная вставка притянута к торцу специальной части ротора. Неравенство

$$F_{пр} > N_0 + C\delta_x \quad (12)$$

представляет собой условие размыкания тормоза:

C — коэффициент жесткости пружины,

δ_x — величина сжатия пружины под действием силы притяжения при притянутой вставке.

Уравнение движения ротора при разгоне СЭД можно записать в виде

$$M = M_c + I \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

Торможение самотормозящегося электродвигателя

Торможение СЭД осуществляется при отключении его от питающей сети. При этом можно выделить следующие этапы торможения: момент отключения двигателя от сети, момент механического торможения и момент останова.

В момент отключения двигателя от сети электромагнитная вставка притянута к торцу ротора, так как сила притяжения $F_{пр}$ больше силы сжатия пружины $N_0 + C\delta_x$ и момент торможения равен нулю. Это объясняется тем, что величина силы притяжения $F_{пр}$ определяется потоками Φ_s и Φ_T , которые при отключении электродвигателя от сети мгновенно изменить своей величины до нуля не могут. Поэтому до тех пор, пока сила притяжения $F_{пр} > N_0 + C\delta_x$ силы сжатия пружины, электромагнитная вставка находится в притянutom положении. Уравнение движения ротора для этого момента имеет вид

$$0 = M_c + I \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

После того как сила притяжения $F_{пр}$ станет меньше силы сжатия пружины $N_0 + C\delta_x$, электромагнитная вставка из-за малой величины

хода практически мгновенно переходит из положения, когда она притянута к торцу ротора, в положение, когда она отжата пружиной.

После этого наступает момент механического торможения. В момент механического торможения величина тормозного момента равна

$$M_T = N_p R, \quad (15)$$

где

$$N = N_0 - F_{пр}, \text{ а } F_{пр} < N_0.$$

Уравнение движения для данного этапа имеет вид

$$0 = M_T + M_c + I \frac{d\omega}{dt}. \quad (16)$$

При останове электродвигателя тормозной момент равен

$$M_T = N_0 \mu R. \quad (17)$$

Сила притяжения $F_{пр}$ равна нулю.

Уравнение движения примет вид

$$0 = M_T + M_c. \quad (18)$$

Совокупность уравнений равновесия напряжений и уравнений движения ротора, соответствующих различным положениям электромагнитной вставки, при пуске и торможении электродвигателя позволяет исследовать электромеханические переходные процессы. Полная система уравнений нелинейна, а поэтому наиболее целесообразно исследования проводить путем моделирования на аналоговой вычислительной машине. Структурная схема модели представлена на рис. 3.

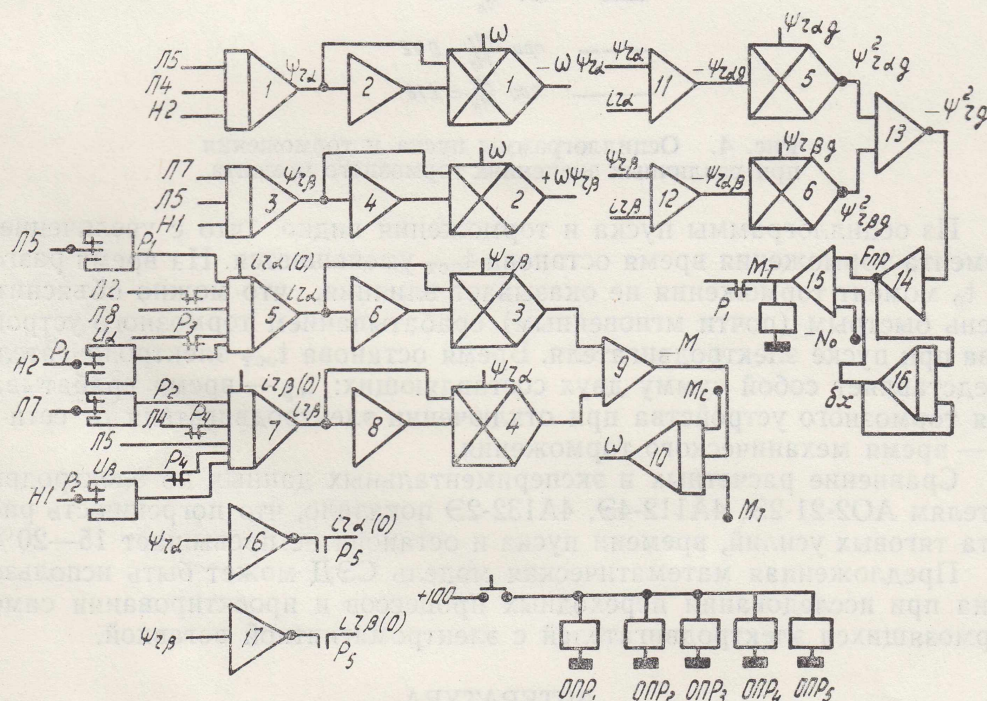


Рис. 3. Структурная схема модели

Моделирование уравнений равновесия напряжений в электродвигателе осуществляется с помощью усилителей Л1÷Л10 и нелинейных блоков Н1-Н4. Усилители Л11-Л15 и нелинейные блоки Н15-Н16 решают уравнения, связанные с величиной силы притяжения, и позволяют осу-

существить переход от одного уравнения движения ротора к другому. Операционные реле ОПР₁-ОПР₅ позволяют осуществлять переход от системы уравнений равновесия напряжений при пуске к системе уравнений при торможении.

При пуске электродвигателя операционные реле ОПР₁-ОПР₅ обесточены. В этом случае решаются уравнения 1, 2, 7, 11—13. Переход от уравнения (11) к уравнению (13) осуществляется с помощью сравнивающего устройства, содержащего усилитель Л15 и реле Р₁.

При торможении электродвигателя на операционные реле ОПР₁-ОПР₅ подается напряжение. При этом контакты реле Р₃, Р₄ размыкаются, Р₁Р₂ переключаются, а Р₅ замыкаются. В таком положении контактов решаются уравнения 4, 7, 14—16. Осциллограммы пуска и торможения электродвигателя при различных моментах торможения приведены на рис. 4.

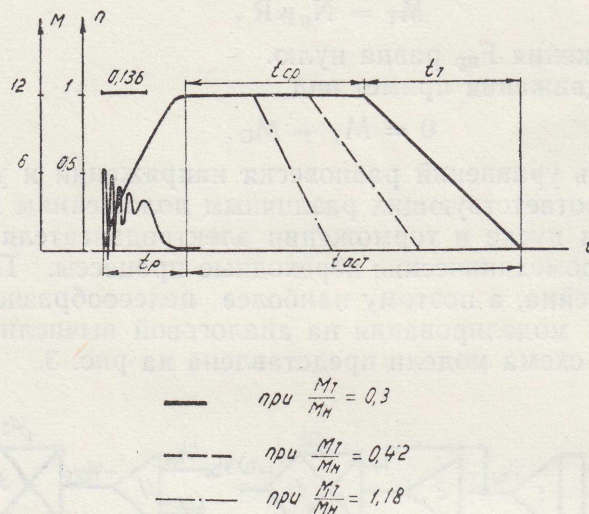


Рис. 4. Осциллограммы пуска и торможения при различных значениях тормозного момента

Из осциллограммы пуска и торможения видно, что с увеличением момента торможения время останова $t_{ост}$ уменьшается. На время разгона t_p момент торможения не оказывает влияния, что можно объяснить очень быстрым (почти мгновенным) срабатыванием тормозного устройства при пуске электродвигателя. Время останова $t_{ост}$ электродвигателя представляет собой сумму двух составляющих: $t_{ср}$ — время срабатывания тормозного устройства при отключении электродвигателя от сети и t_t — время механического торможения.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по электродвигателям АО2-21-2Э, 4А112-4Э, 4А132-2Э показало, что погрешность расчета тяговых усилий, времени пуска и останова не превышает 15—20%.

Предложенная математическая модель СЭД может быть использована при исследовании переходных процессов и проектировании самотормозящихся электродвигателей с электромагнитной вставкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Гильдебранд, М. Г. Жук, В. М. Кирпичников. Решение инженерных задач на электронных вычислительных машинах. Изд. УПИ, Свердловск, 1970.
2. Э. М. Гусельников, Б. С. Цукерман. Самотормозящиеся электродвигатели. «Энергия», 1971.
3. М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, Б. А. Ладензон. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. «Энергия», 1967.